

ANALIZA PROMJENE PRITISKA SF_6 GASA DUŽ MLAZNICE REALNOG VISOKONAPONSKOG SF_6 PREKIDAČA

ANALYSIS OF PRESSURE CHANGE OF SF_6 GAS ALONG THE NOZZLE HIGH VOLTAGE SF_6 CIRCUIT BREAKERS

Armin Hajdarović¹, Mirsad Kapetanović¹, Sead Delić¹, Mahir Muratović¹

Sažetak: Prekidna moć SF_6 prekidača određena je sposobnošću gašenja električnog luka i uspostavljanjem dielektrične čvrstoće nakon gašenja luka. Pritisak gasa i protok gasa kroz mlaznicu igraju važnu ulogu u procesu gorenja i gašenja luka u prekidaču. Zbog toga je analiza pritiska duž mlaznice visokonaponskog (VN) SF_6 prekidača bitna za istraživače i konstruktore VN prekidača. Ona predstavlja veoma koristan alat u optimizaciji konstrukcije, poboljšanju karakteristika i povećanju prekidne moći prekidača.

Određivanje raspodjele pritiska duž mlaznice VN SF_6 prekidača veoma je izazovan inženjerski problem. U ovom radu, na osnovu mjerenja pritiska u ulaznom dijelu, grlu i izlaznom dijelu mlaznice realnog 252 kV VN SF_6 prekidača tipa *puffer*, te poznatih pozicija senzora, nacrtana je raspodjela pritiska duž mlaznice prekidača u strujnoj nuli. Zatim je urađen proračun raspodjele pritiska duž iste mlaznice u programu *ANSYS FLUENT*, te izvršena uporedna analiza. Ulazni podaci za proračun u *ANSYS FLUENT*-u dobijeni su korištenjem EnergoBosovog programa za računarsku simulaciju rada VN SF_6 prekidača.

Ključne riječi: VN SF_6 prekidač, SF_6 gas, *puffer* princip, raspodjela pritiska, mlaznica.

Abstract: SF_6 circuit breaking capacity is determined by the capability of extinguishing the arc and establishment of dielectric strength after arcing. Gas pressure and gas flow through the nozzle play an important role in the process of burning and extinguishing the arc in circuit breakers. Therefore, the analysis of the pressure along the nozzle high voltage (HV) SF_6 circuit breakers is essential for researchers and developers of high voltage circuit breakers. It is a very useful tool in optimizing structure, improving performance and increasing breaking capacity of circuit breakers.

The determination of pressure distribution along the nozzle of a HV SF_6 CB is a very challenging engineering problem. Based on measurements of pressure in the upstream, throat and downstream section of the nozzle of a real HV SF_6 puffer-type circuit breaker, as well as the known positions of sensors, the pressure distribution along the nozzle at the current zero instant has been drawn in this paper. Furthermore, a calculation of pressure distribution along the same nozzle was performed in *ANSYS FLUENT*, and a comparative analysis was carried out. Input data for calculation in *ANSYS FLUENT* have been obtained using the EnergoBos's program for computer simulation of HV SF_6 circuit breakers.

Key words: HV SF_6 circuit breakers, SF_6 gas, puffer principle, pressure distribution, nozzle.

UVOD

Godine, pa i decenije naučnog i istraživačkog rada potrebne su kako bi se VN prekidač mogao komercijalno primijeniti. Posebno mjesto u naučnom i istraživačkom radu VN SF_6 prekidača zauzima analiza pritiska duž mlaznice prekidača. Određivanje raspodjele pritiska duž mlaznice VN SF_6 prekidača veoma je izazovan inženjerski problem. Broj radova posvećenih istraživanju ove oblasti je krajnje ograničen. Najgrublja aproksimacija raspodjele pritiska duž mlaznice prekidača je da se pritisak mijenja linearno. Druga aproksimacija koja se može uvesti je da se mlaznica podijeli na niz podužnih segmenata i izvrši linearizacija pritiska između podijeljenih segmenata. Koristeći mjerenje pritiska u ulaznom dijelu, grlu i izlaznom dijelu mlaznice realnog 252 kV VN SF_6

prekidača tipa *puffer*, tokom operacije sklapanja pod opterećenjem, te poznavajući pozicije senzora koji se koriste za mjerenje, nacrtana je raspodjelu pritiska duž mlaznice u trenutku kada dolazi do gašenja električnog luka, odnosno u strujnoj nuli. Pod pretpostavkom da su senzori bili zaštićeni od dejstva električnog luka, nacrtana raspodjela pritiska duž mlaznice pokazuje da je linearna aproksimacija zaista najgrublja.

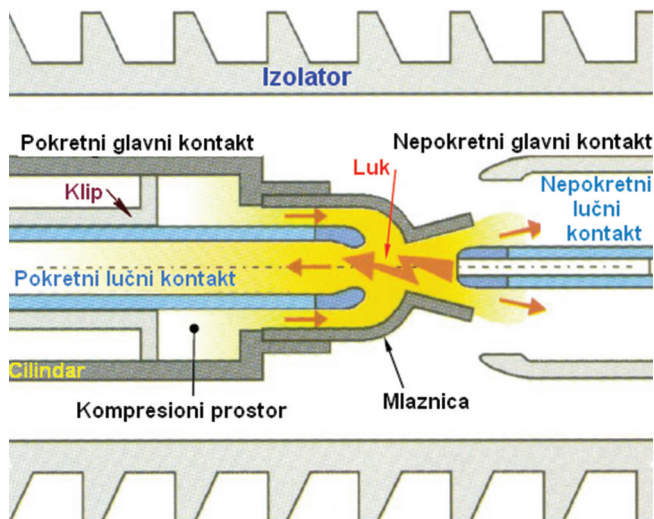
Uz pomoć programa (*HV CB Simulation*) za računarsku simulaciju rada VN SF_6 prekidača dobijeni su ulazni podaci za proračun raspodjele pritiska duž mlaznice koristeći program *ANSYS FLUENT*. Proračun je urađen na primjeru realnog prekidača na kojem je rađeno mjerenje, te izvršena uporedna analiza.

1. PRINCIP RADA VN SF_6 PREKIDAČA TIPRA PUFFER

Zajedničko za sve prekidače koji rade na potisnom principu (*puffer*) je komprimiranje gasa SF_6 tokom operacije

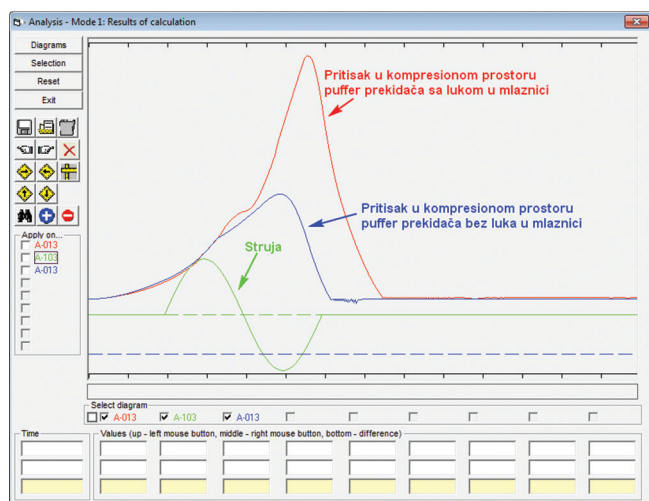
¹ EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo, Bosna i Hercegovina
armin.hajdarovic@energobos.com
Rad dostavljen: oktobar 2013. Rad prihvaćen: novembar 2013.

isklopa u kompresionom prostoru između klipa i cilindra, koji se pod djelovanjem sile pogonskog mehanizma, kreće zajedno sa sklopom pokretnih kontakata (Slika 1). Stvoreni nadpritisak izaziva strujanje gasa kojim se hladi luk koji gori unutar mlaznice. Strujanje prestaje nakon što pokretni sklop dostigne krajnji položaj na isklopu. Važno je obezbijediti efikasno oduhavanje u cijelom intervalu od minimalnog do maksimalnog trajanja luka. Osnovni uslov je da kretanje kontakata bude duže od maksimalnog trajanja luka. To se postiže adekvatnim izborom hoda i brzine kontakata.



Slika 1: Princip rada SF_6 prekidača tipa *puffer*

Važna karakteristika prekidača na potisnom principu je zavisnost pritiska u kompresionom prostoru od nazivne kratkospojne struje i trajanja luka. Na Slici 2 prikazana je spomenuta zavisnost koja je dobijena korištenjem EnergoBosovog programa za računarsku simulaciju rada VN SF_6 prekidača (*HV CB Simulation*) na primjeru realnog 252 kV prekidača. Tokom operacije isklopa bez strujnog opterećenja, maksimalni pritisak koji se javlja u prostoru između klipa i cilindra dostiže otprilike dvostruku vrijednost pritiska punjenja gasa SF_6 (plava kriva na Slici 2).



Slika 2: Pritisak u kompresionom prostoru *puffer* prekidača

Međutim, kada u mlaznici gori luk kroz koji protiče velika struja kratkog spoja, prečnik luka naraste do te mjere da blokira protok gasa kroz mlaznicu. Ovo začepljenje mlaznice tokom intervala velike vrijednosti struje uzrokuje dodatno povećanje pritiska gasa u kompresionom prostoru, koji može dostići nekoliko puta veću vrijednost nego u slučaju operacije isklopa bez luka (crvena kriva na Slici 2). Povećanje pritiska je posljedica smanjenja isticanja gasa uslijed začepjenja mlaznice, ali i zagrijavanja gasa u kompresionom prostoru uzrokovanog toplotnim djelovanjem luka.

Kada vrijednost struje počne opadati prema nuli, prečnik luka se smanjuje, oslobađa se sve veći presjek u grlu mlaznice kroz koju ističe gas. Najveći intenzitet gasne struje se uspostavlja u trenutku prirodnog prolaska struje kroz nulu (u slučaju prikazanom na Slici 2 u trenutku drugog prolaska kroz strujnu nulu), odnosno u trenutku kada je to najpotrebnije za uspješno gašenje luka. Visoka vrijednost generisanog pritiska u kompresionom prostoru zahtijeva veliku vrijednost pogonske sile kako bi se spriječilo zaustavljanje, pa čak i vraćanje kontakata prekidača. Kod potisnog principa gašenja luka, cjelokupnu energiju potrebnu za njegovo oduhavanje, mora obezbijediti pogonski mehanizam prekidača.

Najznačajnija prednost prekidača na potisnom principu je izuzetna jednostavnost sklopnog elementa. To im osigurava veliku pouzdanost i mehaničku trajnost. Povećanju pouzdanosti na najvišim naponima doprinosi i mali broj sklopnih elemenata po polu. Navedene prednosti prekidača na potisnom principu posebno dolaze do izražaja u metalom oklopljenim, gasom SF_6 izolovanim postrojenjima, jer pružaju izuzetne mogućnosti u smislu smanjenja dimenzija i veliku sigurnost u pogonu. Osnovni nedostatak prekidača na potisnom principu je relativno dug hod s velikim pogonskim silama, koje mogu obezbijediti samo pogonski mehanizmi s velikom akumuliranom energijom. Jaki i pouzdani pogonski mehanizmi su veoma skupi što se direktno odražava na ukupnu cijenu prekidača [1].

2. ODREĐIVANJE RASPODJELE PRITISKA DUŽ OSE LUKA

Određivanje raspodjele pritiska duž ose luka, odnosno duž mlaznice ($p_1, p_2, \dots, p_n$) svodi se na izračunavanje stanja gasa u pojedinim segmentima duž ose luka, a koje je vezano za režim isticanja gasa kroz mlaznicu. Režim isticanja SF_6 gasa je određen maksimalnom brzinom koja se može pojaviti u minimalnom presjeku isticanja.

Prema tome, razlikujemo tri režima isticanja [1]:

- **Podkritični (podzvučni) režim isticanja:** podrazumijeva takva stanja gasa duž mlaznice pri kojima je uspostavljena brzina gasa u minimalnom presjeku isticanja manja od brzine zvuka. Ispunjenje ovog uslova za minimalni presjek znači njegovu važnost u bilo kojem presjeku posmatranog gasnog toka.

- **Kritični (zvučni) režim isticanja:** podrazumijeva takva stanja gasa duž mlaznice pri kojima je uspostavljena brzina gasa u minimalnom presjeku isticanja jednaka brzini zvuka.
- **Nadkritični (nadzvučni) režim isticanja:** podrazumijevao bi takva stanja gasa duž mlaznice pri kojima bi uspostavljena brzina gasa u minimalnom presjeku isticanja bila veća od brzine zvuka. Međutim, obično se pretpostavlja da brzina gasa u mlaznici ne može biti veća od brzine zvuka. Pretpostavka da je maksimalna brzina isticanja gasa kroz mlaznicu jednaka brzini zvuka se uvodi zbog kompleksnosti proračuna nadzvučnog strujanja, a opravdavaju je zadovoljavajući rezultati koji se postižu primjenom tako dobivenog modela.

Odnos brzine gasa i brzine zvuka u njemu predstavlja Machov broj:

$$M_b = \frac{v}{c_a} \quad (1)$$

gdje je:

v – brzina gasa,
 c_a – brzina zvuka.

Ako je $M_b < 1$ radi se o potkritičnom, ako je $M_b = 1$ o kritičnom, a $M_b > 1$ radi se o natkritičnom režimu isticanja. Kako nije moguće unaprijed odrediti režim isticanja, vrši se provjera masenog protoka za obje pretpostavke: da se radi o podkritičnom, a zatim o kritičnom režimu isticanja. S obzirom na to da maseni protok u potkritičnom režimu ne može biti veći od masenog protoka u kritičnom režimu isticanja, režim isticanja određuje manji maseni protok. U slučaju pretpostavke podkritičnog režima isticanja, polazeći od poznatog stanja gasa u nivou ulazne ravni na početku luka u posmatranom trenutku, koje je određeno varijablama stanja: p_{ul} , T_{ul} i ρ_{ul} , kojem odgovara promjena specifične entalpije Δh_{ul} i promjeni entropije Δs_{ul} , te poznatog pritiska gasa u nivou izlazne ravni p_{izl} , izračunavaju se preostale dvije nepoznate veličine koje određuju stanje gasa u nivou izlazne ravni: temperatura T_{izl} i gustina ρ_{izl} . Dvostruki iterativni postupak kojim se određuju ove veličine zasnovan je na pretpostavci da je proces isticanja izenotropan ($\Delta s_{izl} = \Delta s_{ul}$). U prvoj iterativnoj petlji određuje se gustina ρ_{izl} , a u drugoj iterativnoj petlji određuje se temperatura T_{izl} . Nakon određivanja stanja gasa u nivou izlazne ravni, izračunava se pripadajuća vrijednost promjene specifične entalpije u nivou izlazne ravni Δh_{izl} . Maseni protok gasa G je direktno proporcionalan površini poprečnog presjeka isticanja (A), gustine (ρ) i brzine isticanja gasa (v), te se na osnovu toga računa maseni protok gasa kroz stvarni presjek isticanja (presjek gasnog toka) u nivou izlazne ravni mlaznice G_{izl} [1].

U slučaju pretpostavke kritičnog režima isticanja (analogno postupku opisanom za pretpostavku podkritičnog režima), polazeći od poznatog stanja gasa na nivou ulazne ravni na početku luka u datom vremenskom trenut-

ku, koje je određeno varijablama stanja p_{ul} , ρ_{ul} i T_{ul} , te pretpostavke da je u prvoj iteraciji pritisak gasa p_{min} u nivou minimalnog presjeka mlaznice A_{min} jednak pritisku gasa u izlaznom prostoru, izračunavaju se preostale dvije nepoznate veličine T_{min} i ρ_{min} , koje određuju stanje gasa u minimalnom poprečnom presjeku mlaznice. Nakon toga se izračunava brzina isticanja gasa u nivou minimalnog presjeka mlaznice, te se izračunata vrijednost poredi s brzinom zvuka (c_a) za stanje gasa dobijeno u prvoj iteraciji (p_{min} , ρ_{min} , T_{min}), čime je određen odgovarajući Machov broj. Machov broj se koristi kao kriterij za maksimalno pretpostavljenu brzinu isticanja u nivou minimalnog poprečnog presjeka mlaznice [1].

Dakle, za slučaj pretpostavke kritičnog režima isticanja, potrebno je zatvoriti i treću iteracionu petlju po Machovom broju koja obuhvata dvostruku iteracionu petlju. Zatim se izračuna maseni protok gasa G_{min} kroz minimalni presjek isticanja A_{min} , te se vrši poređenje izračunatih vrijednosti masenih protoka G_{izl} i G_{min} na osnovu kojeg se može odrediti režim isticanja gasa kroz mlaznicu. Ukoliko je $G_{min} < G_{izl}$, režim isticanja je kritični i zbog toga je stvarni maseni protok $G_r = G_{min}$. U slučaju da je $G_{min} > G_{izl}$, režim isticanja je podkritičan, tako da je $G_r = G_{izl}$.

2.1. Određivanje stanja gasa u bilo kom presjeku gasnog toka

Poznavajući geometriju mlaznice u kojoj gori luk, određuje se poprečni presjek gasnog toka. Zbog veoma niske gustine plazme u stablu luka u odnosu na gustinu hladnog gasa koji okružuje luk u aksijalnom strujanju, može se pretpostaviti da se isticanje gasa dešava samo između stabla luka i unutrašnjih zidova mlaznice (bijela površina unutar mlaznice na Slici 3). Prema tome, stvarni poprečni presjek gasnog toka je manji nego slobodni poprečni presjek isticanja (presjek bez luka) na bilo kojem mjestu unutar mlaznice [1]. Konačno se može pristupiti izračunavanju stanja gasa u bilo kom presjeku gasnog toka duž mlaznice u kojoj gori luk. Primjenjuje se iterativni postupak koji se zasniva na sljedećim pretpostavkama:

- entropija sistema je konstantna ($\Delta s = \Delta s_{ul} = const.$),
- maseni protok u gasnom toku duž mlaznice je konstantan ($G_1 = G_2 = \dots = G_n = G_r = const.$) – zakon kontinuiteta gasnog toka.

Iterativni postupak se bazira na korekciji gustine u j -tom poprečnom presjeku za koji se vrši proračun. Pritisak se računa iz jednačine stanja gasa, dok se temperatura određuje iterativno iz uslova nepromjenjivosti entropije $\Delta s_j = \Delta s_{ul} = const.$ Na osnovu izračunatih parametara stanja gasa u i -toj iteraciji ($p_{j,i}$, $T_{j,i}$, $\rho_{j,i}$) se može odrediti odgovarajuća promjena specifične entalpije $\Delta h_{j,i}$ u posmatranom presjeku A_j , kao i odgovarajući maseni protok $G_{j,i}$ kroz taj presjek:

$$G_{j,i} = \rho_{j,i} \cdot A_j \sqrt{v_{ul}^2 - 2(\Delta h_{j,i} - \Delta h_{ul})} \quad (2)$$

gdje je:

$G_{j,i}$ – odgovarajući maseni protok,
 $\rho_{j,i}$ – odgovarajuća gustoća SF₆ gasa,
 A_j – odgovarajući presjek isticanja,
 v_{ul} – brzina gasa u nivou ulazne ravni,
 $\Delta h_{j,i}$ – odgovarajuća promjena specifične entalpije,
 Δh_{ul} – promjena specifične entalpije u nivou ulazne ravni.

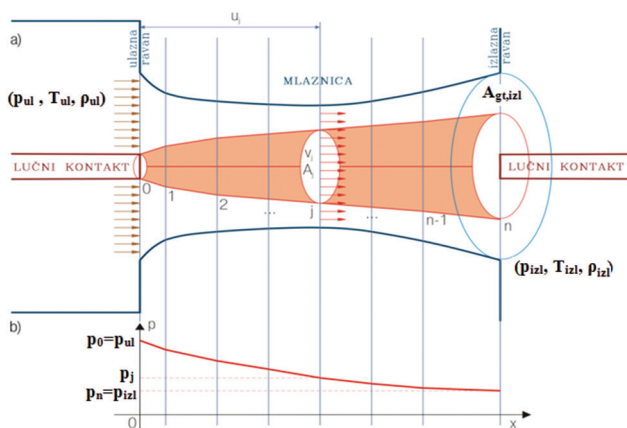
Radi zadovoljavanja zakona kontinuiteta gasnog toka postavlja se uslov:

$$|G_{j,i} - G_r| < \varepsilon_4 \quad (3)$$

gdje je:

$G_{j,i}$ – referentni maseni protok,
 ε_4 – proizvoljno mali, unaprijed zadani pozitivan broj.

Ukoliko ovaj uslov nije zadovoljen, koriguje se vrijednost gustine i postupak se ponavlja sve do ispunjenja uslova (3).



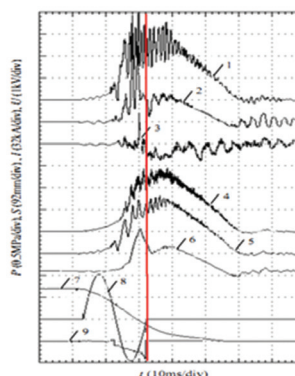
Slika 3: a) Shematski prikaz mlaznice s aksijalnim oduhavanjem luka. b) Ilustracija incijalne pretpostavke linearnog opadajućeg gradijenta pritiska duž mlaznice. [1]

Ovako proračunate vrijednosti iz posljednje iteracije se pripisuju parametrima stanja gasa u posmatranom presjeku (p_j , T_j , ρ_j). Na ovaj način se može izračunati stanja gasa u pojedinim presjecima duž mlaznice, a samim tim pritisci (p_1 , p_2 , ..., p_n). Linearnom interpolacijom se može doći do zadovoljavajuće tačnih vrijednosti pritiska u bilo kom presjeku gasnog toka, čime je u potpunosti definisana tražena raspodjela pritiska duž ose luka i mlaznice [1].

3. IZMJERENA KARAKTERISTIKA PRITISKA 252 kV VN SF₆ PREKIDAČA TIPA PUFFER

U nastavku ovog rada prikazane su izmjerene karakteristike pritiska kompresionom prostorom (*pufferu*), ulaznom dijelom, grlu i izlaznom dijelom mlaznice realnog 252 kV VN SF₆ prekidača tipa *puffer* [2]. Nazivna prekidna struja kratkog spoja prekidača je 50 kA, hod kontakata 220 mm, a dužina mlaznice 208 mm. U literaturi [2] prikazan je sklopni element prekidača, te pozicije senzora na kojima je mjeran pritisak SF₆ gasa. Na Slici 4 prikazani su

valni oblici pritiska za prvi maksimum struje od 66.6 kA. Pritisak punjenja SF₆ gasa je 7 bara. Vrijeme trajanja električnog luka je 12 ms. Vertikalnom linijom na slici označen je trenutak gašenja električnog luka, odnosno trenutak strujne nule. Električni luk najviše utiče na senzore u ulaznom dijelu i grlu mlaznice, tako da je na ovim mjestima mjerenje vršeno korištenjem izolacione cijevi sa i bez prigušenja. Izolaciona cijev napravljena je od PTFE materijala i ima ulogu da senzore, koji se koriste za mjerenje pritiska, zaštiti od visokog napona i od visoke temperature. Izolaciona cijev može biti ispunjena sitnim PTFE česticama koje prigušuju visokofrekventne oscilacije koje se javljaju kao posljedica pojave stojećeg (ili stacionarnog) talasa unutar cijevi. Izolaciona cijev koja nije ispunjena česticama naziva se cijev bez prigušenja, dok se izolaciona cijev ispunjena PTFE česticama naziva cijev s prigušenjem. Kada se koristi cijev bez prigušenja postoje velike visokofrekventne (VF) oscilacije, tako da je vrlo teško utvrditi pravu vrijednost pritiska u pojedinim dijelovima mlaznice [2, 3]. Cilj je da se dobije što tačnija raspodjela pritiska duž mlaznice u strujnoj nuli, tako da će se očitavanja u ulaznom dijelu i grlu mlaznice vršiti s valnih oblika koji su dobijeni korištenjem izolacione cijevi s prigušenjem.



- 1 – Pritisak u ulaznom dijelu mlaznice (mjerenje uz korištenje izolacione cijevi bez prigušenja).
- 2 – Pritisak u grlu mlaznice (mjerenje uz korištenje izolacione cijevi bez prigušenja).
- 3 – Pritisak u izlaznom dijelu mlaznice (mjerenje uz korištenje izolacione cijevi bez prigušenja).
- 4 – Pritisak u *pufferu* (direktno mjerenje).
- 5 – Pritisak u ulaznom dijelu mlaznice (mjerenje uz korištenje izolacione cijevi s prigušenjem).
- 6 – Pritisak u grlu mlaznice (mjerenje uz korištenje izolacione cijevi s prigušenjem);
- 7 – Hod kontakata prekidača.
- 8 – Struja.
- 9 – Napon luka.

Slika 4: Valni oblici pritiska za prvi maksimum struje od 66.6 kA [2]

Tabela I prikazuje vrijednosti pritiska u strujnoj nuli za sva četiri mjerenja, koja su očitana sa Slike 4. Pritisak u *pufferu* očitao je s karakteristike 4, pritisak u ulaznom dijelu mlaznice s karakteristike 5, pritisak u grlu s karakteristike 6, dok je pritisak u izlaznom dijelu mlaznice očitao s karakteristike 3. Da bi se nacrtala raspodjela pritiska potrebno je definisati pozicije senzora. Budući da je vršeno mjerenje i u *pufferu* (dužina *puffera*/kompresionog prostora u zatvorenom položaju je 260 mm), uzet će se u obzir i to mjerenje, te izlazni prostor (prostor iza mlaznice) u kojem nije vršeno mjerenje, ali se pretpostavlja da je vrijednost pritiska u strujnoj nuli jednaka vrijednosti pritiska punjenja SF₆ gasa, odnosno 7 bara. Dužina mlaznice je 208 mm, a raspodjela pritiska nacrtana je od 0

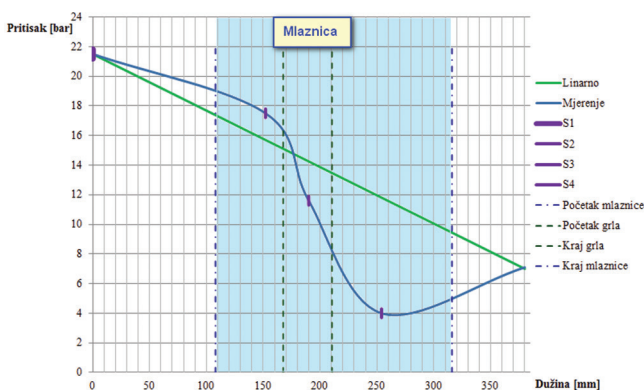
do 380 mm, gdje je početak mlaznice na 108 mm, a kraj na 316 mm (senzor u kompresionom prostoru je smješten na 108 mm od početka mlaznice – te se od te tačke crta raspodjela pritiska – tačka označena sa 0 mm). Dio od 0 mm do 108 mm predstavlja raspodjelu pritiska u kompresionom prostoru (za ostatak kompresionog prostora nije crtana raspodjela pritiska jer se smatra da je vrijednost pritiska približno jednaka kao u tački u kojoj je smješten senzor), a od 316 mm do 380 mm je raspodjela pritiska u izlaznom prostoru prekidača (često se ovaj prostor naziva komora za hlađenje).

Tabela I: Izmjerene vrijednosti pritiska u strujnoj nuli i pozicije senzora

	Puffer	Mlaznica			Izlazni prostor
		Ulazni dio	Grlo	Izlazni dio	
Pritisak [bar]	21.5	17.5	11.6	4	*7
Pozicije senzora [mm]	0	152	190	254	380
Oznaka senzora	S1	S2	S3	S4	-

* – pretpostavljena vrijednost

Na osnovu Tabele I moguće je nacrtati izmjerenu raspodjelu pritiska u strujnoj nuli za 252 kV VN SF₆ prekidača tipa puffer (Slika 5).



Slika 5: Usporedba linearne aproksimacije i nacrtane raspodjele pritiska na osnovu mjerenja

Plavom bojom označen je region mlaznice. Najgrublja aproksimacija raspodjele pritiska od kompresionog prostora (puffera) do izlaznog prostora (odnosno duž mlaznice VN SF₆ prekidača) je da se pritisak mijenja linearno. Kako bi uporedili raspodjele pritiska, obje karakteristike su nacrtane na istoj slici (Slika 5). Sa slike se uočava da je linearna aproksimacija raspodjele pritiska zadovoljavajuća samo u ulaznom dijelu mlaznice.

4. PRORAČUN RASPODJELE PRITISKA DUŽ MLAZNICE 252 kV VN SF₆ PREKIDAČA

Na osnovu poznatih podataka u nivou ulazne i izlaznih ravni, koristeći program ANSYS FLUENT izvršen je proračun raspodjele pritiska duž mlaznice 252 kV VN SF₆ prekidača tipa puffer.

4.1. Opis i specifikacija problema

Model stacionarnog isticanja koji odgovara isticanju SF₆ gasa u VN prekidačima je model stacionarnog stišljivog isticanja. Pojam stišljivog toka gasa se koristi kako bi se definisao tok u kojem je izražena promjena gustine gasa duž toka, za razliku od nestišljivih tokova, gdje se pretpostavlja njena nepromjenljivost. Promjenu gustine medija uzrokuje promjena pritiska između dvije tačke.

U ANSYS FLUENT-u, stacionarni stišljivi tok pretpostavlja izenotropski tok SF₆ gasa [4]. Pretpostavka izenotropskog procesa također implicira nepromjenljivost totalnog pritiska duž mlaznice. Ukupna historija procesa prekidanja je odgovorna za ponašanje električnog luka u strujnoj nuli, tako da računarska simulacija mora uzeti u obzir proces prekidanja od samog početka. SF₆ prekidač je uopšteno cilindričnog oblika, s postojećom aksijalnom simetrijom, što omogućava 2-D simulaciju procesa, što može značajno uštediti računarske i vremenske resurse. Proračunski primjer uzima u obzir prethodno rečeno, s tim da se ukupni prethodni proces do strujne nule računa pomoću programa za računarsku simulaciju rada prekidača visokog napona (HV CB Simulation) [5]. Podaci koji se dobijaju iz HV CB Simulation, predstavljaju ulazne podatke za proračun u ANSYS FLUENT-u.

Među njih spadaju vrijednosti sljedećih varijabli:

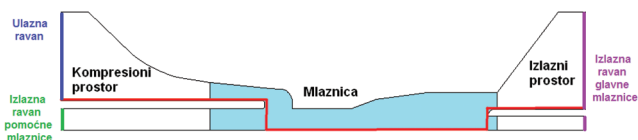
- pozicija nepokretnog lučnog kontakta unutar mlaznice u trenutku strujne nule (ovisna o trajanju luka, prodiranju lučnih kontakata i njihovom hodu),
- statički pritisak, statička temperatura i gustina na nivou ulazne ravni i izlazne/izlaznih ravni,
- ukupni maseni tok SF₆ gasa na nivou ulazne ravni,
- pojedinačni maseni tok/tokovi na nivou izlazne/izlaznih ravni,
- specifične toplote pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini na nivou ulazne ravni i izlazne/izlaznih ravni,
- brzina zvuka na nivou ulazne ravni i izlazne/izlaznih ravni.

Vrijednosti navedenih varijabli koje će predstavljati granične uslove za proračun stacionarnog isticanja u ANSYS FLUENT-u, odnose se na trenutak strujne nule u kojoj se dešava konačno gašenje električnog luka. Varijable stanja gasa (pritisak, temperatura, specifična gustina) se u programu za računarsku simulaciju VN prekidača tretiraju kao usrednjene vrijednosti tih parametara unutar pojedinih komora prekidača. Po ovoj pretpostavci, ove varijable stanja opisuju stanje gasa unutar cjelokupne komore prekidača. Na osnovu geometrije sklopnog elementa, te ostalih podataka koji su navedeni [2], napravljena je ulazna datoteka za HV CB Simulation. Na Slici 4 karakteristika 7 predstavlja hod kontakata prekidača, koji je također potreban kao ulazni podatak za HV CB Simulation. Verifikacija rezultata dobijenih programom za računarsku simulaciju rada VN SF₆ prekidača napravljena je usporedbom proračunatog pritiska u kompresionom prostoru

(pufferu) i izmjerene vrijednosti pritiska. Nakon verifikacije, pristupa se proračunu ostalih potrebnih podataka.

4.2. Geometrija mlaznice i granični uslovi

Pozicija nepokretnog lučnog kontakta, odnosno geometrija mlaznice u strujnoj nuli određena je na osnovu poznate pozicije kontakata u zatvorenom položaju prekidača (prodiranje kontakata), trajanja luka i vrijednosti hoda kontakata u strujnoj nuli koristeći *HV CB Simulation*. Koristeći ove podatke, te podatke navedene u literaturi [2], nacrtana je mlaznica prekidača koja će biti korištena za proračun raspodjele pritiska u *ANSYS FLUENT*-u (pored mlaznice nacrtan je dio kompresionog i izlaznog prostora prekidača). Na osnovu pripremljenog crteža izrađena je tekstualna datoteka pogodna za unos geometrije u *ANSYS DesignModeler*. Mlaznice VN prekidača su aksijalno simetrične, što omogućava da se isticanje kroz mlaznicu posmatra kao dvodimenzionalni problem. Ovim se dolazi do znatnog pojednostavljenja geometrije, čime se skraćuje vrijeme proračuna. Poboľjšanjem kvalitete mreže konačnih elemenata moguće je ostvariti tačnije rezultate proračuna. Na Slici 6 prikazana je geometrija sklopnog elementa (puffer, mlaznica i izlazni prostor), gdje je mlaznica označena plavom bojom. Crvena linija na slici predstavlja konturu po kojoj će se crtati raspodjela pritiska koja se proračuna u *ANSYS FLUENT*-u. Također, na slici je označena ulazna ravan, izlazna ravan glavne mlaznice i izlazna ravan pomoćne mlaznice.



Slika 6: Geometrija sklopnog elementa za proračun raspodjele pritiska 252 kV VN prekidača

Zbog pojednostavljenja analize uvodi se pretpostavka da se pritiska mijenja samo aksijalno (duž ose x), odnosno zanemarena je radialna promjena pritiska (duž ose y).

Kao što je prethodno opisano, u programu *HV CB Simulation* potrebno je izvršiti simulaciju za 252 kV VN prekidač, kako bi se dobili uslovi na granicama proračunskog domena u trenutku strujne nule, koji će služiti da se odrede granični uslovi prilagođeni ulazu koji zahtijeva *ANSYS FLUENT*.

Rezultati proračuna i svi parametri od interesa za analizirani prekidač, uz odgovarajuće trajanje luka (12 ms kao i u slučaju eksperimenta) dati su u nastavku. Podaci su podijeljeni u 4 grupe, i to: osnovni podaci (Tabela II), podaci za ulaznu ravan (Tabela III), podaci za izlaznu ravan pomoćne mlaznice (Tabela IV) i podaci za izlaznu ravan glavne mlaznice (Tabela V).

Podaci u ovoj formi nisu prikladni za unos u *ANSYS FLUENT* kao granični uslovi. Stoga je pomoću ovih podataka potrebno izvršiti nekoliko dodatnih proračuna, kako bi se prilagodili ulazu zahtijevanom od *ANSYS FLUENT*-a. U

Tabela II. Osnovni podaci

Hod (prodiranje) kontakata [mm]	161.73 (55)
Trajanje luka [ms]	12
Hidraulički dijametar ulazne ravni [mm]	127
Hidraulički dijametar izlazne ravni glavne mlaznice [mm]	160
Hidraulički dijametar izlazne ravni pomoćne mlaznice [mm]	31
Površina ulazne ravni [m ²]	0.0212
Površina izlazne ravni glavne mlaznice [m ²]	0.0223
Površina izlazne ravni pomoćne mlaznice [m ²]	0.0007

Tabela III. Podaci za ulaznu ravan

Statički pritisak u nivou ulazne ravni [bar]	21.3025
Statička temperatura u nivou ulazne ravni [K]	340.94
Specifična zapremina gasa na nivou ulazne ravni [m ³ /kg]	0.00748
Specifična toplota pri konstantnom pritisku na nivou ulazne ravni [J/kg·K]	1399.9
Specifična toplota pri konstantnoj zapremini na nivou ulazne ravni [J/kg·K]	804.16
Brzina zvuka na nivou ulazne ravni [m/s]	153.96
Maseni protok na nivou ulazne ravni [kg/s]	18.92

Tabela IV. Podaci za izlaznu ravan pomoćne mlaznice

Statički pritisak u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [bar]	16.5507
Statička temperatura na nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [K]	480.54
Specifična zapremina gasa na nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [m ³ /kg]	0.016
Specifična toplota pri konstantnom pritisku na nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [J/kg·K]	889.6
Specifična toplota pri konstantnoj zapremini na nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [J/kg·K]	817.56
Brzina zvuka na nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [m/s]	167.6
Maseni protok na nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [kg/s]	3.02

Tabela V. Podaci za izlaznu ravan glavne mlaznice

Statički pritisak u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [bar]	7.042
Statička temperatura na nivou izlazne ravni glavne mlaznice [K]	473.85
Specifična zapremina gasa na nivou izlazne ravni glavne mlaznice [m ³ /kg]	0.03772
Specifična toplota pri konstantnom pritisku na nivou izlazne ravni glavne mlaznice [J/kg·K]	862.8
Specifična toplota pri konstantnoj zapremini na nivou izlazne ravni glavne mlaznice [J/kg·K]	803.03
Brzina zvuka na nivou izlazne ravni glavne mlaznice [m/s]	167.1
Maseni protok na nivou izlazne ravni glavne mlaznice [kg/s]	15.9

nastavku rada ukratko je opisan matematski model stišljivog isticanja u *ANSYS FLUENT*-u, te za svaku granicu navedene jednačine potrebne za dodatni proračun.

Stišljivo isticanje se karakterizira vrijednosti Machovog broja (jednačina 1). U jednačini (1), c predstavlja brzinu zvuka u gasu i određuje se kao:

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (4)$$

gdje je:

γ – odnos specifičnih toplote pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (5)$$

R – univerzalna gasna konstanta,

T – temperatura gasa.

Pri vrijednostima Machovog broja manjeg od 1, govori se o podzvučnom isticanju. Za Machove brojeve niže od 0.1, efekti stišljivosti su zanemarivi i varijacija gustine gasa sa pritiskom se može zanemariti pri modelovanju toka. Zvučni režim isticanja se karakteriše vrijednosti Machovog broja koja se približava 1, gdje se efekti stišljivosti ne mogu zanemariti. Kada vrijednost Machovog broja premaši vrijednost 1, govori se o nadzvučnom isticanju, gdje se mogu pojaviti udarni valovi i drugi efekti koji imaju bitan uticajna karakteristike isticanja. Stišljivo isticanje je u matematskom modelu *ANSYS FLUENT*-a karakterizirano totalnim pritiskom p_0 i totalnom temperaturom T_0 [4]. Ove veličine su povezane sa statičkim pritiskom i temperaturom preko slijedećih relacija:

$$\frac{p_0}{p} = e^{\left(\frac{\int_r^{r_0} \frac{C_p}{T} dT}{R} \right)} \quad (6)$$

gdje je:

C_p – specifična toplota pri konstantnom pritisku,

p_0 – totalni pritisak,

p – statički pritisak,

T_0 – totalna temperatura,

T – statička temperatura.

Ako je vrijednost C_p konstantna, jednačina (6) se svodi na:

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \text{ i } \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (7)$$

gdje je M – Machov broj.

Ove jednačine opisuju varijaciju statičkog pritiska i temperature pri promjeni brzine isticanja uz izenotropski proces [7]. Naprimjer, uz zadani odnos pritiska u nivou ulazne i izlazne ravni (totalni u odnosu na statički), relacija (7)

se može koristiti za procjenu Machovog broja u nivou izlazne ravni koji bi postojao u jednodimenzionalnom izenotropskom toku. Za određenu vrijednost ovog odnosa za SF_6 gas relacija (7) predviđa začepljenje (Machov broj iznosi 1 – zvučno strujanje) koji se uspostavlja u nivou minimalnog poprečnog presjeka isticanja, npr. u grlu mlaznice. U poprečnim presjecima iza minimalnog, gas može dodatno ubrzati, čime se dolazi u režim nadzvučnog isticanja uz dodatni pad pritiska ili može usporiti, što dovodi do režima podzvučnog isticanja, uz popratno povećanje pritiska. Ako je nadzvučni tok gasa izložen narinutom povećanju pritiska, nastaje udarni val, uz nagli pad pritiska i usporavanja koji se uspostavlja poprijeko u odnosu na pravac prostiranja udarnog vala. Jednačine (7) služe za iznalaženje ukupnih temperatura svih ravni i ukupnog pritiska na nivou ulazne ravni, uz prateće jednačine (1) i (5), dok je

$$\mu = 1.533 \cdot 10^{-5} + 4.8 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 300) \quad (8)$$

gdje je T – temperature gasa, odabrana za računanje dinamičke viskoznosti gasa.

U svim ovim jednačinama (osim jednačine za viskoznost) potrebna je vrijednost brzine isticanja gasa na odgovarajućoj granici, koja se računa na osnovu sljedeće jednačine:

$$v = G \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{A} \quad (9)$$

gdje je:

v – brzina isticanja gasa,

G – maseni protok,

ρ – gustoća gasa,

A – površina presjeka isticanja.

Ovim setom su definisani ulazni podaci vezani za stišljivi model isticanja SF_6 gasa. Kako bi se izračunali parametri za definisanje turbulentnog modela koristit će se jednačina za računanje Reynoldsovog broja:

$$Re = \frac{\rho D_H v}{\mu} \quad (10)$$

gdje su:

μ – dinamički koeficijent viskoznosti,

v – srednja brzina strujanja fluida,

D_H – karakteristična linearna dimenzija (npr. prečnik cijevi),

ρ – gustoća fluida.

i jednačine intenziteta turbulencije koja glasi:

$$I = 0.16 Re_{D_H}^{-\frac{1}{8}} \quad (11)$$

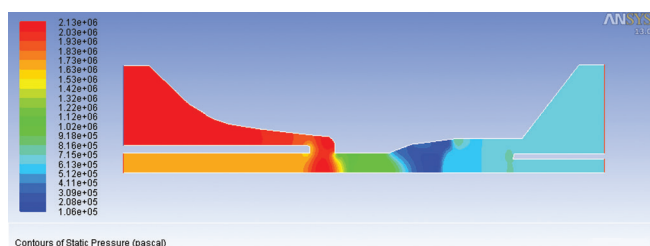
Na osnovu ovog seta jednačina, preračunati su potrebni podaci prilagođeni ulazu *ANSYS FLUENT*-a (Tabela VI).

Tabela VI. Preračunati podaci prilagođeni ulazu u ANSYS FLUENT

Preračunati podaci	
Totalni pritisak u nivou ulazne ravni [bar]	21.3373
Statički pritisak u nivou ulazne ravni [bar]	21.3025
Totalna temperatura u nivou ulazne ravni [K]	341.1
Viskoznost u nivou ulazne ravni [%]	2.25
Hidraulični dijametar ulazne ravni [mm]	127
Statički pritisak u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [bar]	7.042
Totalna temperatura u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [K]	474.30
Viskoznost u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [%]	2.34
Hidraulični dijametar izlazne ravni glavne mlaznice [mm]	160
Statički pritisak u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [bar]	16.5507
Totalna temperatura u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [K]	483.63
Viskoznost u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [%]	2.32
Hidraulični dijametar izlazne ravni pomoćne mlaznice [mm]	31

4.3. Analiza rezultata proračuna i usporedba sa mjerenjem

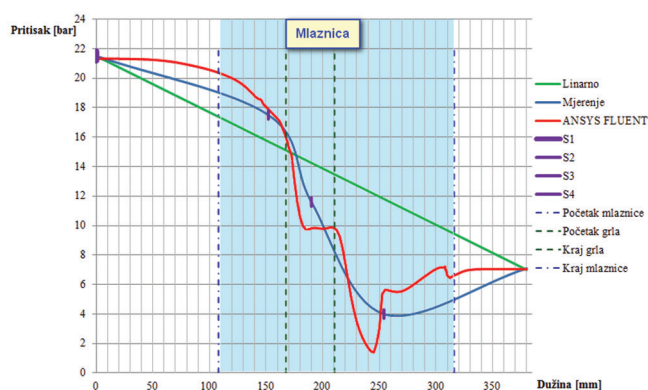
Na Slici 7 prikazane su konture pritiska za geometriju sklopnog elementa sa Slike 6, odnosno konture pritiska 252 kV VN SF₆ prekidača tipa *puffer*. Sa lijeve strane slike prikazana je skala pritiska (Pascal) po bojama.

Slika 7: Konture pritiska 252 kV VN SF₆ prekidača tipa *puffer*

Analizirajući Sliku 7 uočava se da u izlaznom dijelu mlaznice dolazi do pojave udarnog talasa, koji je karakteriziran nadzvučnim brzinama uslijed čega dolazi do drastičnog pada pritiska duž udarnog vala (modro plavi dio na slici). Iza fronte udarnog talas javlja se zona podzvučnog strujanja i dolazi do povećanja pritiska. Pri ulasku u grlo mlaznice dolazi do pada pritiska uslijed ubravanja gasa. U grlu mlaznice dolazi do začepjenja i ostvaruje se zvučno strujanje (Machov broj jednak jedan). Na desnoj strani Slike 8 zbog radijusa nepokretnog lučnog kontakta dolazi do ubravanja gasa, što ima za posljedicu blagi pad pritiska na tom mjestu.

Koristeći konturu na Slici 6 (crvena linija na spomenutoj slici) izvršeno je eksportovanje rezultata iz ANSYS FLUENT-a u Excel, te nacrtana raspodjela pritiska duž mlaznice prekidača (Slika 8). Na istoj slici prikazana je linearna aproksimacija raspodjele pritiska, te „izmjerena“ raspodjela pritiska duž mlaznice VN SF₆ prekidača tipa *puffer*.

Sa Slike 8 primjećuje se dosta dobro slaganje proračunatih rezultata s eksperimentalnim rezultatima raspodjele



Slika 8: Usporedba proračuna, mjerenja i linearne aproksimacije raspodjele pritiska

pritiska duž mlaznice VN SF₆ prekidača. Upoređujući mjerenja, odnosno pozicije na kojima su bili montirani senzori, uočava se da se proračunati pritisak u ulaznom i izlaznom dijelu veoma dobro slaže sa mjerenjima (senzori S2 i S4). U grlu mlaznice odstupanja proračuna i mjerenja su oko 2 bara. To se može objasniti na osnovu zaštite senzora od dejstva električnog luka. Najveća energija od električnog luka akumulirana je u grlu mlaznice, pa se može zaključiti da senzor (S3) nije bio dovoljno zaštićen tokom eksperimenata. Raspodjela je nacrtana koristeći aproksimaciju da je u izlaznom prostoru pritisak jednak pritisku punjenja SF₆ gasa, pošto mjerenje pritiska na kraju mlaznice nije vršeno. Također, još jednom je potrebno napomenuti da je linearna aproksimacija raspodjele pritiska duž mlaznice veoma gruba aproksimacija, što se potvrdilo pored mjerenja i proračunom u ANSYS FLUENT-u.

5. ZAKLJUČAK

Određivanje raspodjele pritiska duž mlaznice svodi se na izračunavanje stanja gasa u pojedinim segmentima duž ose luka, a koje je vezano za režim isticanja gasa kroz mlaznicu. Režim isticanja SF₆ gasa je određen maksimalnom brzinom koja se može pojaviti u minimalnom presjeku isticanja. Prema tome, razlikujemo tri režima isticanja: potkritični režim isticanja, kritični režim isticanja i natkritični režim isticanja.

Na osnovu mjerenja pritiska u dijelovima mlaznice 252 kV VN SF₆ prekidača tipa *puffer*, nacrtana je raspodjela pritiska duž mlaznice VN prekidača.

Koristeći program ANSYS FLUENT izvršen je proračun raspodjele pritiska duž mlaznice VN prekidača, te urađena uporedna analiza. Iz analize se zaključuje da je linearna aproksimacija raspodjele pritiska najgrublja aproksimacija, te se pritisak duž mlaznice mijenja drugačije, što je pokazano mjerenjem i proračunom.

Korištenjem poznatih modela koji dovode u vezu vrijednost probojnog napona međukontaktne rastojanja s rezultatima proračuna raspodjele električnog polja i gustoće SF₆ gasa (pritisak gasa je povezan sa gustoćom

gasa preko jednačine stanja realnog SF_6 gasa), moguće je odrediti vrijednost probojnog napona međukontaktnog rastojanja. Poređenjem probojnog napona s primijenjenim naponom (definisanim standardom) za vrijeme nakon strujne nule, moguće je dati odgovor da li će doći do dielektričnog proboja međukontaktnog rastojanja.

Iz ovoga se zaključuje da je analiza raspodjele pritiska duž mlaznice veoma moćan alat u optimizaciji konstrukcije prekidača, te da je veoma bitna karika za razvoj i dizajn mlaznice VN prekidača.

LITERATURA

- [1] M. Kapetanović: *High Voltage Circuit Breakers*, ETF Sarajevo 2011.
- [2] Y. Guan, G. Yue, J. X. He, W. Liu, J. Wu, J. Wu: *Pressure Measurement and Characteristic Analysis on a 252 kV Puffer Type SF6 Circuit Breaker*, IEEE PES Transactions on Power Delivery, 2013.
- [3] Y. Guan, W. Liu, J. Wu, W. Li: *Interrupter Pressure Measurement of a 252 kV SF6 Circuit Breaker*, Conf. paper, 1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, Xi'an, China, 2011.
- [4] ANSYS FLUENT 12.0, *User's Guide, Tutorial Guide and Theory Guide*, 2009.
- [5] M. Kapetanović, A. Ahmethadžić, S. Delić, M. Muratović: *Computer Simulation of HV circuit breakers interruption*, EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo, august 2012.
- [6] A. Hajdarović: *Mjerenje pritiska u komorama VN SF6 prekidača*, Završni rad, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Juni 2013.
- [7] G. Bar – Meir: *Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics*, 2013.

BIOGRAFIJA

Armin Hajdarović je rođen 1989. godine u Mostaru. Godine 2011. završio je prvi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, a 2013. godine drugi ciklus studija, master studij. Zaposlen je u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo, a područja interesovanja su mu: modelovanje i razvoj VN prekidača, razvoj softvera za simulaciju rada VN SF_6 prekidača i proračun električnih polja. Od 2013. godine član je BH K CIGRÉ.

Mirsad Kapetanović je rođen 1953. godine u Visokom. Diplomirao je 1976. godine, a doktorsku disertaciju je odbranio 1997. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Autor je više knjiga i radova iz oblasti VN prekidača, kao i različitih projekata iz ove oblasti. Od 1990. godine je član radne grupe CIGRÉ WG 13.01 (*Practical Application of Arc Physics in Circuit Breakers*), a od 1996. do 2002. godine je bio punopravni član studijskog komiteta SC 13 (*Switching Equipment*), a od 2002. do 2008. godine punopravni član studijskog komiteta SC A3 (*High Voltage Equipment*) međunarodne CIGRÉ. Trenutno radi kao profesor na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu i kao rukovodilac razvoja u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo.

Sead Delić je rođen 1972. godine u Tuzli. Diplomirao je na Fakultetu elektrotehnike i maštinstva u Tuzli 1997. godine, a magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 2009. godine. Član je BH K CIGRÉ i redovni član studijskog komiteta SC A3 međunarodne CIGRÉ. U periodu 1997. – 2011. radio je u Energoinvestu na razvoju VN prekidača i MOP-a. Trenutno je uposlen u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo. Student je na doktorskom studiju na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Područja profesionalne orijentacije su mu razvoj VN prekidača i MOP-a, razvoj softvera za simulaciju rada VN prekidača i proračun električnih polja.

Mahir Muratović je rođen 1987. godine u Sarajevu. Prvi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu završio je 2009. godine, a 2011. godine drugi ciklus studija, master studij. Student je dokorskog studija na istoimenom fakultetu. Od 2011. godine zaposlen je u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo i aktivno je angažiran na projektima razvoja VN prekidača naponskih nivoa 145 kV, 245 kV i 420 kV.